بررسی تغییرات ناهمسانگردی قبل و بعد از زمین‌لرزه‌ی ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ سی‌سخت (Mn=۵/۴)

محدثه محمدزاده[۱]، احمد سدیدخوی[۲]
[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران, mohamadzadeh.m4@ut.ac.ir
[۲]استادیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران, asadid@ut.ac.ir

چکیده

ناهمسانگردی لرزه‌ای یک رفتار در زمین است‌که تقریباً در سرتاسر زمین قابل مشاهده‌است و جدایش‌موج‌برشی واضح‌ترین شاخصه‌ی ناهمسانگردی است. این ابزار تحقیق برای اکتشافات ژئوفیزیک، مطالعه‌ی منابع زلزله و تعریف حوزه‌ی تنش فعال استفاده‌شده‌است. علاوه‌براین، به‌گفته برخی‌از محققان، نظارت بر تغییرات پارامترهای ناهمسانگرد می‌تواند به درک فرآیندهای زلزله‌زا وآتشفشانی یاحتی پیش‌بینی زلزله کمک‌کند. پیش‌بینی زلزله هنوز یکی‌از چالش‌برانگیزترین و بحث‌برانگیزترین سوالات درجامعه‌ی علمی است. دردهه‌ی گذشته مطالعات بسیاری درزمینه‌ی تغییرات پارامترهای ناهمسانگردی قبل و بعداز زمین‌لرزه به عنوان یکی‌از پیش نشانگرهای لرزه‌ای انجام‌شده‌است.

دراین مطالعه داده‌های شش ماه قبل و شش ماه بعداز زمین‌لرزه ۲۹ بهمن ۱۳۹۹سی‌سخت با بزرگای ۵/۴ مورد بررسی قرارگرفت و پارامترهای ناهمسانگردی آن‌ها محاسبه گردید. درنتیجه‌ی این محاسبات متوسط جهت‌گیری موج قطبیده‌ی **S** سریع, قبل‌از زلزله برابر ۱۱۴/۵و پس اززلزله این مقدارمتوسط به ۹۳/۴۶ می‌رسد. اختلاف زمانی بین دو موج‌قطبیده‌ی آهسته‌و سریع هم قبل‌از وقوع زلزله برابر ۰/۰۸±۰/۰۱ و پس‌از زلزله به مقدار ۰/۱±۰/۰۱ افزایش می‌یابد که این تغییرات بیانگر این‌است که قبل‌از زمین‌لرزه خردشدگی اتفاق‌افتاده‌است و ترک‌ها درحال افزایش می‌باشند که این‌امر سبب افزایش ناهمسانگردی منطقه گردیده‌است. همچنین بررسی راستای ناهمسانگردی نشان‌داد که راستای ناهمسانگردی قبل‌از زلزله درجهت NW-SE بوده است که پس از وقوع این راستا به جهت NE-SW کشیده‌شده‌است.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانگردی, جدایش موج برشی, پیش نشانگری زلزله

Investigating anisotropy variation before and after the Sisakht's 17th February 2020 earthquake (Mn=5.4)

Mohadeseh Mohamadzadeh [1], Ahmad Sadidkhouy[2]

[1]*Master student, Institute of geophysics, University of Tehran,* mohamadzadeh.m4@ut.ac.ir
[2] *Assistant Professor, Institute of geophysics, University of Tehran, asadid@ut.ac.ir*

Abstract

Seismic anisotropy is an almost ubiquitous behavior of the Earth, and shear wave splitting is the most unambiguous indicator of anisotropy. This research tool has been used for geophysical discoveries, studying earthquake sources, and defining active stress areas. In addition, according to some researchers, monitoring changes in anisotropic parameters can help to understand seismic and volcanic processes or even predict earthquakes. In this study, the data of six months before and six months after the earthquake of 2021 February 17 (Mn=5.4) were analyzed and anisotropy parameters were calculated. As a result of these calculations, the average orientation of the fast polarized S wave before the earthquake was 114.5°; after the earthquake, the average value reached 93.46°. The time delay between the two slow and fast polarized S waves is 0.08±0.01 before the earthquake and increases to 0.1±0.01 after the earthquake, which indicates that crushing had occurred before the earthquake and the cracks are increasing. It has caused an increase in the anisotropy of the region. Also, the investigation of the anisotropy direction showed that the anisotropy direction before the earthquake was NW-SE, but after the main event, its direction was changed to NE-SW.

Keywords: Anisotropy, Shear wave splitting, Earthquake precursor

۱ مقدمه

دلایل متعددی برای توضیح ناهمسانگردی موج برشی در پوسته مانند ساختار مربوط به چشمه به دلیل جهت‌گیری ترجیحی کانی‌ها یا شکستگی‌ها پیشنهاد شده‌است. نظریه‌های دیگر پذیرفته‌شده در سراسر جهان ناهمسانگردی موج‌برشی را مربوط به حضور مایعات و میدان تنش فعال می‌دانند که ترک‌ها را باز می‌کند یا خردترک‌ها را در حجم سنگ ایجاد می‌کند. علاوه‌براین، مطالعه‌ی ناهمسانگردی لرزه‌ای به تعریف وضعیت شکست پوسته (یعنی شدت و جهت) بدون نیاز به بررسی‌های گران‌قیمت کمک می‌کند (پیچینینی و همکاران, ۲۰۱۳).

جدایش‌موج‌برشی[۲۱]، پدیده‌ای است که هنگام ورود یک موج برشی به یک محیط ناهمسانگرد رخ می‌دهد. موج برشی برخوردی به دو موج برشی قطبیده تقسیم می‌شود. به عبارت ساده‌تر در یک محیط ناهمسانگرد یک مولفه از موج برشی سریع‌تر از مولفه‌ی عمود بر آن طی مسیر می‌کند. این تفاوت درسرعت باعث می‌گردد که با ادامه‌ی انتشار در محیط ناهمسانگرد دو مولفه ازهم جداشده و در زمان‌های مختلف به گیرنده‌ها برسند. این پدیده را جدایش موج برشی می‌نامند. پارامترهای جدایش، شامل تفاوت زمان سیر بین امواج برشی سریع و آهسته (δt) و جهت قطبش سریع S است که با زاویه‌ی (ψ) در صفحه‌ی نرمال(عمودبر مسیر پرتو) تعریف‌شده‌است. پارامترهای جدایش، اثرات یکپارچه‌ی مسیر ناهمسانگردی را بر روی موج برشی اندازه‌گیری می‌کنند و اجازه می‌دهند جهت و قدرت ناهمسانگردی مدل‌سازی شود (وکسی و همکاران, ۲۰۰۸).

اندازه گیری دقیق جدایش موج برشی لرزه ای به دلیل پیچیدگی سیگنال موج برشی دشوار است. انواع مختلفی از تکنیک‌ها برای اندازه گیری تاخیرهای زمانی و قطبی شدن تقسیم موج برشی در بالای زلزله‌های کوچک توسعه داده‌شده‌است (کرامپین‌وگائو, ۲۰۰۶). در بین تکنیک‌های توسعه‌یافته و آزمایش‌های گسترده‌ی انجام‌شده برای برآورد ناهمسانگردی لرزه‌ای، دو مورد بیشترین کاربرد را دارند. اولین مورد براساس تجزیه‌ی ماتریس کوواریانس و دومی براساس تکنیک همبستگی متقابل است که زمانی خوب عمل می‌کند که جزء آهسته S قابل مشاهده باشد و به‌دلیل پراکندگی قوی، به‌سرعت توسط فازهای ورودی بعدی آلوده نشود. از سوی دیگر تجزیه ماتریس کواریانس زمانی خوب عمل می‌کند که ورود موج S تکانشی باشد که می‌تواند در زمین‌لرزه‌های آتشفشانی بسیار کم‌عمق اتفاق‌بیفتد (پیچینینی و همکاران, ۲۰۱۳). روش همبستگی متقابل براساس این اصل عمل می‌کند که پس‌از انتشار در یک محیط ناهمسانگرد یک موج برشی به اجزای آهسته و سریع قطبیده متعامد با شکل پالس‌های یکسان تقسیم می‌شود بنابراین این روش به دنبال به‌حداکثر رساندن همبستگی متقابل بین مولفه‌های افقی اصلاح شده است (لانگ‌و سیلور, ۲۰۰۹). هم‌چنین دراین روش اگر فاز برشی دچار جدایش نشده‌باشد و حرکت ذرات[۲۲], حرکت خطی اولیه را نشان‌دهد اندازه‌گیری به عنوان پوچ[۲۳] دسته‌بندی می‌شود.

۲ روش تحقیق

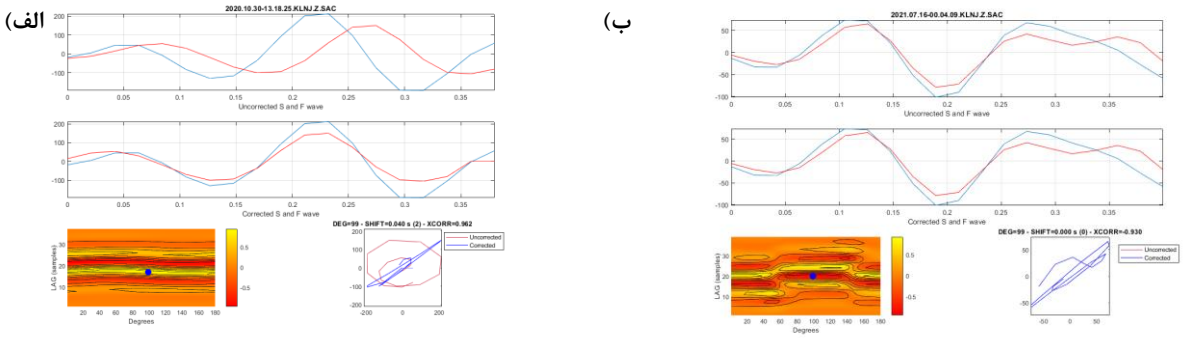
در بامداد روز ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ زمین‌لرزه‌ای به بزرگای ۵/۴ شهر سی‌سخت واقع در استان کهگلویه‌و بویراحمد را به لرزه‌درآورد. هدف ما دراین مطالعه بررسی تغییرات ناهمسانگردی قبل و بعداز وقوع این زمین‌لرزه می‌باشد. برای مطالعه‌ی پارامترهای ناهمسانگردی (δt) و (ψ) داده‌ها باید در پنجره‌ی موج‌برشی باشند, به‌این معنا که زاویه‌ی ورود به ایستگاه بین ۰ تا ۴۵ درجه باشد. دراین راستا داده‌های پیوسته‌ی شش ماه قبل و شش ماه بعداز زمین‌لرزه‌ی ثبت‌شده توسط ایستگاه (KLNJ) واقع‌در ۱۳/۴۰ کیلومتری رویداد اصلی, از مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران دریافت‌شد و تعداد ۴۵۰ رویداد با مشخصات ذکرشده استخراج گردید. دراین مطالعه برای محاسبه‌ی پارامترهای ناهمسانگردی, ما ازروش همبستگی متقابل که توسط کدخودکار Anisomat+ اجرا می‌شود, استفاده‌کردیم

---

21 *Shear wave splitting*
22 *Particle motion*
23 *null*

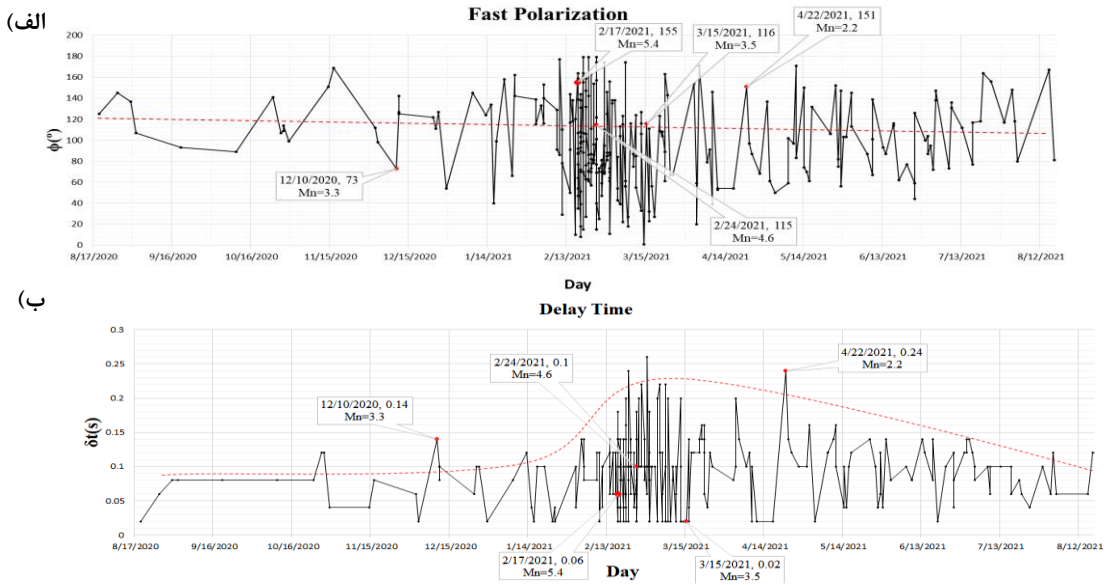
زیرا در مطالعه‌ی ناهمسانگردی لرزه‌ای در منطقه‌ی تکتونیکی، وجود شیب‌های قوی توپوگرافی و پراکندگی آن بسیارقوی نیست و مطمئناً از اهمیت کمتری برخورداراست, به‌همین دلیل روش همبستگی متقابل برای این مطالعه مناسب می‌باشد. مراحل انجام این مطالعه به‌طورخلاصه شامل موارد زیر است: ۱)شناسایی و استخراج رویدادها از داده‌های پیوسته ایستگاه, ۲)تصحیح هدر۲۴ و مشخص‌کردن زمان‌رسید فازها و هم‌چنین تبدیل به فرمت SAC به‌وسیله‌ی پکیج Obspy درپایتون, ۳)به‌دست‌آوردن پارامترهای ناهمسانگردی به‌وسیله‌ی نرم افزار Anisomat+, ۴)بررسی تغییرات پارامترهای ناهمسانگردی قبل و بعداز وقوع زمین‌لرزه.

پارامترهای ناهمسانگردی که مطابق مراحل گفته شده توسط نرم افزار Anisomat+ به‌دست‌آمد که شامل ۳۰۳ پاسخ و ۱۴۷پوچ بود. شکل ۱ نمایشگر یک نمونه از تعیین پارامترهای ناهمسانگردی مربوط به رویدادی در ۹ آبان ۱۳۹۹ و یک نمونه پوچ مربوط به رویدادی در۲۵ تیر ۱۴۰۰ می‌باشد.



شکل۱. الف) نمونه‌ای خروجی نرم‌افزار anisomat+ که پاسخ‌های (δt)و(ψ)حاصل شده است. ب) نمونه‌ای ازخروجی پوچ که درآن موج دچارجدایش نشده‌است وحرکت ذرات خطی اولیه را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تغییرات ناهمسانگردی. تغییرات این دوپارامتر دراین بازه‌ی زمانی مورد بررسی قرارگرفت که نمایش آن در شکل۲ قابل مشاهده‌است.



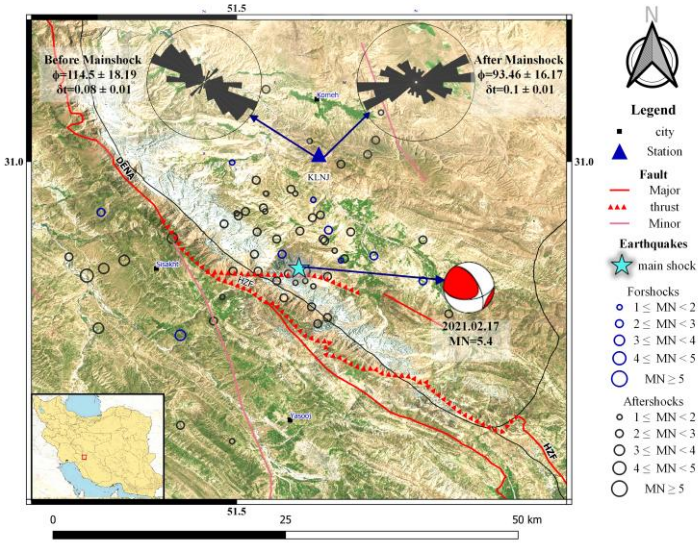
شکل۲. الف) نمایش تغییرات پارامتر (ψ) که به وضوح قبل‌از وقوع زمین‌لرزه مقادیرآن به‌هم ریخته‌شده و بعداز گذشت ۶ ماه ازوقوع زمین‌لرزه هم کماکان زمین حالت تکتوتیکی خودرا حفظ کرده ومقادیر به حالت پایدار نرسیده‌است (خط‌چین قرمز متوسط اندازه‌ی مقدار پارامتر

---

24 header

در کل بازه نمایش می‌دهد)، ب) نمایش تغییرات پارامتر (δt)، همانطورکه قابل‌مشاهده‌است مقدارآن از یک ماه قبل از وقوع زمین لرزه شروع به افزایش می‌کند و بعد ازآن هم با شیب ملایمی شروع به کاهش می‌کند (خط‌چین قرمز روند تغییرات پارامتر را به‌طور متوسط نمایش می‌دهد).

هم‌چنین بررسی تغییرات راستای ناهمسانگردی قبل و بعداز وقوع زمین لرزه درشکل۳ به نمایش درآمده‌است. نمایش راستای ناهمسانگردی به وضوح تغییر جهت ناهمسانگردی بعد از زمین لرزه را نشان می‌دهد.



شکل۳. نقشه تکتونیکی منطقه شامل رومرکز رویداد اصلی و پس‌لرزه‌ها و پیش لرزه‌ها و نمایش تغییرات راستای ناهمسانگردی قبل و بعداز زمین‌لرزه‌ی اصلی. همانطور که درشکل قابل مشاهده است راستای ناهمسانگردی بعداز زمین لرزه از جهت شمال‌غربی_جنوب‌شرقی به سمت شمال‌شرقی_جنوب‌غربی مایل شده است.

۳ نتیجه‌گیری

دراین مطالعه شکل موج‌های ثبت شده توسط ایستگاه KLNJ واقع در ۱۳/۴۰ کیلومتری رومرکز زمین لرزه ۲۹بهمن ۱۳۹۹ سی‌سخت در بازه‌ی زمانی ۱۲ماه را مورد تجزیه و تحلیل قراردادیم و تغییرات ناهمسانگردی منطقه را به کمک پارامترهای (δt) و(ψ) بررسی کردیم. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهدکه میانگین تاخیرزمانی (δt) قبل‌از وقوع زلزله برابر ۰/۰±۰۸/۰۱ است که این مقدار از حدود یک ماه قبل از وقوع زلزله شروع به افزایش می‌کند و بعد از وقوع زلزله مقدار آن به طور متوسط به ۰/۱±۰/۰۱ می‌رسد(شکل۲ب). این تغییرات می‌توانند به دلایل مختلفی مانند افزایش ترک‌ها و شکاف‌ها باشند که منجر به وقوع زمین‌لرزه شده‌اند. همچنین برآورد پارامتر(ψ) نشان دهنده‌ی افزایش افت‌وخیز مقادیر پارامتر درنزدیکی زمان وقوع زمین‌لرزه است که بیانگر افزایش تنش در بازه‌ی وقوع زمین‌لرزه و افزایش ترک‌ها در راستاهای مختلف می‌باشد(شکل۲الف). علاوه‌براین بررسی راستای ناهمسانگردی قبل‌از زمین‌لرزه راستای NW-SE را نشان می‌دهد که هم‌راستا با گسل زاگرس مرتفع (HZF) که در۶ کیلومتری رومرکز زمین‌لرزه‌ی سی‌سخت واقع‌شده‌است می‌باشد(شکل۳). اما بعداز زمین‌لرزه متوسط راستای ناهمسانگردی جهت NE-SW را نشان می‌دهد که می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که زمین‌لرزه اصلی سبب ایجاد عمده ترک‌هایی دراین راستا یا فعال‌شدن گسلی فرعی دراین جهت شده‌است.

منابع

Piccinini, D., Pastori, M., & Margheriti, L. (2013). ANISOMAT+: An automatic tool to retrieve seismic anisotropy from local earthquakes. Computers & geosciences, 56, 62-68.

Vecsey, L., Plomerová, J., & Babuška, V. (2008). Shear-wave splitting measurements—Problems and solutions. Tectonophysics, 462(1-4), 178-196.

Crampin, S., & Gao, Y. (2006). A review of techniques for measuring shear-wave splitting above small earthquakes. Physics of the earth and planetary interiors, 159(1-2), 1-14.

Long, M. D., & Silver, P. G. (2009). Shear wave splitting and mantle anisotropy: Measurements, interpretations, and new directions. Surveys in Geophysics, 30(4), 407-461.